

# Evaluación de un índice para cuantificar sequías hidrológicas utilizando series sintéticas que incluyen variaciones temporales generadas por distintos procesos

*Leticia Vicario<sup>1,2</sup>, Carlos M. García<sup>2,3</sup>, Juan Carlos Berton<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> Instituto Nacional del Agua-Centro de la Región Semiárida. Vélez Sarsfield y Ambrosio Olmos. (5000) Córdoba.

<sup>2</sup> Centro de Estudios y Tecnología del Agua. FCEfYN - Universidad Nacional de Córdoba.

<sup>3</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

<sup>4</sup> Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba.

Mail de contacto: [lvicariotm@gmail.com](mailto:lvicariotm@gmail.com)

## RESUMEN

Las sequías hidrológicas se manifiestan con una reducción en variables que cuantifican la disponibilidad hídrica en distintos cuerpos de agua y tiene importantes efectos negativos en el aspecto socio-económico de una región, por lo que es relevante contar con metodologías precisas para su detección y cuantificación. Una de las metodologías utilizadas para analizar sequías hidrológicas es el índice SDI (StreamflowDroughtIndex). La utilización del índice SDI requiere de series de datos de caudal de alta calidad y longitud suficiente. Las series históricas de caudales registradas presentan variaciones temporales generadas por distintos procesos que podrían afectar los resultados provistos por el índice: variaciones en su tendencia temporal; fluctuaciones de baja frecuencia; fluctuaciones de alta frecuencia (interanual) y fluctuaciones aleatorias. En este trabajo se evalúa al índice SDI utilizando series sintéticas que incluyen las distintas variaciones temporales citadas previamente. Las series sintéticas generadas presentan parámetros estadísticos similares a una serie histórica de caudales observados en un curso fluvial de la región pampeana central de Argentina. En este trabajo se observa que el índice SDI permite identificar y caracterizar las sequías hidrológicas aun cuando las series presenten distintas variaciones temporales utilizando intervalos de agregación de 9 y 12 meses.

**Palabras clave:** Sequía hidrológica – índice SDI – Series sintéticas – Región pampeana central de Argentina

## ABSTRACT

Hydrological drought can be detected by a reduction in the variables quantifying water availability in different water bodies. The Hydrological drought has negative effects on the socio-economic aspect of a region. Thus, it is important to have precise methodologies for drought detection and quantification. One of the recently used methodologies for analyzing hydrological drought is the "SDI" (Streamflow Drought Index). The SDI's use requires long records of streamflow data with high quality. These records includes temporal variation generated by different processes: changes in its temporal trend, low-frequency fluctuations, high frequency fluctuations and random fluctuations. This study asses the SDI index using synthetic time series that include the different temporal variations mentioned previously. The generated synthetic series have statistical parameters similar to a streamflow time series recorded in a river of the central region of Argentina. This paper shows that SDI index allows to identify and characterize hydrological drought on the basis of streamflow records with different temporal variations using aggregation intervals of 9 and 12 months

**Keywords:** Hydrological drought - SDI index - Synthetic series - Central region of Argentina

# 1 INTRODUCCION

La escasez de precipitaciones en un área y en un período de tiempo determinado genera un déficit hidrológico denominado “sequía”. Esta adversidad climática tiene importantes efectos negativos en los aspectos socio-económicos de una región (Vicario, et al 2007).

Las sequías se clasifican según el objetivo de estudio y la variable hidroclimática utilizada. La sequía hidrológica se determina a partir de una reducción en las escurrimientos en cursos fluviales, en los niveles de lagos y embalses. Este fenómeno está lejos de ser un problema netamente meteorológico, es un problema multidisciplinario que involucra no solo a la meteorología e hidrología, sino también a la geología y a otras ciencias geofísicas (Palmer, 1965).

A pesar de que la sequía meteorológica generada por la escasez de precipitaciones (variable fundamental en la ocurrencia de distintos tipos de sequías inclusive de las hidrológicas) es un fenómeno de mesoescala, habitualmente el análisis de las sequías hidrológicas se realiza a nivel local, ya sea en una sección hidrométrica, en un embalse o lago natural, o en una cuenca de aporte. En cuanto a la escala temporal de estudio, es conveniente estudiar a las sequías hidrológicas a nivel mensual o anual (según el objetivo de estudio), ya que sus efectos se observan con un desfase en el tiempo, respecto de los fenómenos hidro-meteorológicos y físicos que le dan origen.

Para cuantificar y detectar los periodos de sequias es necesario estudiar y analizar los umbrales específicos de estos procesos según la región hidro-climática (Mishra y Singh, 2010).

Una de las metodologías utilizadas en la actualidad para analizar sequías hidrológicas es el índice de sequía hidrológico SDI (por sus siglas en Inglés: StreamflowDroughtIndex). La aplicación del SDI es una herramienta que permite realizar de forma sencilla, utilizando distintos intervalos de agregación, la determinación y clasificación de las sequías que pueden ocurrir en una cuenca. Sin embargo, su cálculo requiere datos de caudal de alta calidad y de longitud suficiente para estimar con precisión la frecuencia de los eventos de sequía (Wagner Gómez, et al., 2012). Además, las series históricas de caudales registradas presentan variaciones temporales generadas por distintos procesos: a) variaciones en su tendencia temporal debido a cambios antrópicos o climáticos; b) fluctuaciones de baja frecuencia con tiempos de característicos de varios años como por ejemplo las fluctuaciones debidas al ENSO); c) fluctuaciones de alta frecuencia debido a variaciones interanuales; d) fluctuaciones aleatorias debido a la aleatoriedad de los procesos hidro-climáticos y al ruido asociado al registro de los datos. En algunas situaciones, cuando una o más de estas fluctuaciones son relevantes podrían afectar la bondad del modelo del SDI para detectar y cuantificar los periodos de sequía.

En este trabajo se evalúa un índice para cuantificar sequías hidrológicas (en particular se utiliza el modelo SDI, evaluado a su vez con distintos intervalos de agregación) utilizando series sintéticas que incluyen las distintas variaciones temporales citadas anteriormente. A su vez, las series sintéticas generadas presentan parámetros estadísticos similares a los observados en una serie histórica de caudales observada en un curso fluvial de la región central de Argentina.

En primer lugar se presenta el modelo del índice SDI, luego se generan las series sintéticas con distintas variaciones temporales y se aplican sobre ellas el mencionado índice. Finalmente se analizan los resultados y se presentan las principales conclusiones.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Sobre el índice SDI

Para analizar las sequías hidrológicas se utilizó el índice de sequía hidrológico SDI (por sus siglas en Inglés: StreamflowDroughtIndex)

La aplicación del SDI es una herramienta que permite realizar de forma sencilla la determinación y clasificación de las sequías que pueden ocurrir en una cuenca. Sin embargo, su cálculo requiere datos de caudal de alta calidad y de longitud suficiente para estimar con precisión la frecuencia de los eventos de sequía (Wagner Gómez; et al., 2012)

Este índice de sequía se basa en los valores de caudales, volúmenes o escurrimientos acumulados durante períodos de tres, seis, nueve y doce meses dentro de cada año hidrológico (Nalbantis, 2008). Estos intervalos de tiempo comienzan el primer mes del año hidrológico considerado (en este caso Julio) y se denominan k1 (hasta Septiembre), k2 (hasta Diciembre), k3 (hasta Marzo) y k4 (hasta Junio). Dichos intervalos permiten analizar, en caso de que se detecten eventos de sequías, la evolución los mismos dentro de cada año hidrológico considerado.

Para estimar este índice se calcula:

$$V_{ik} = \sum_{j=1}^{3k} Q_{ij} \tag{1}$$

$$i = 1,2, \dots, n; j = 1,2, \dots, 12; k = 1,2,3,4$$

Donde  $V_{i,k}$  es el volumen de caudales acumulados para el año hidrológico  $i$  en  $j$  meses, correspondientes a los respectivos intervalos  $k$ .

Siendo:

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - V_k}{s_k} \tag{2}$$

Donde  $SDI_{i,k}$  el índice de sequía de caudales para el año hidrológico  $i$  y el intervalo considerado  $k$ .  $V_k$  y  $s_k$  son, respectivamente, el valor promedio y desvío estándar de todos los valores de  $V$ , para el intervalo  $k$  considerado, a lo largo de la serie de datos. Los rangos de valores del índice SDI para calificar el nivel de las sequías hidrológicas se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1** - Valores del índice SDI según los distintos estados de sequía hidrológica

<b>Descripción</b>	<b>Criterio</b>
Sin sequía	$SDI > 0$
Sequía suave	$-1 \leq SDI < 0$
Sequía moderada	$-1,5 \leq SDI < -1$
Sequía severa	$-2 \leq SDI < -1,5$
Sequía extrema	$SDI < -2$

## 2.2 Sobre la generación de Series sintéticas:

La Hidrología estocástica, se basa en la premisa de que las series de datos temporales varían según una componente determinística y otra probabilística. La necesidad de profundizar y validar estudios relacionados a los recursos hídricos y debido a la escasez de registros hidro-meteorológicos para tal fin, ha motivado el análisis de distintos fenómenos hidrológicos a través de la generación de series sintéticas (SS). Dicho procedimiento se enmarca dentro de la Hidrología estocástica ya que tiene la finalidad de observar y cuantificar la influencia de las distintas componentes que conforman un modelo representativo de una determinada variable hidrológica. Como antecedente en la materia, Thomas y Fiering (1962) desarrollaron un modelo de caudales sintéticos utilizando los parámetros de la media, la varianza y el coeficiente de correlación para la obtención de “valores esperados”.

### 2.2.1. Variaciones temporales consideradas

Se determina que un valor de caudal medio mensual  $Q$  (m<sup>3</sup>/s) se constituye de la siguiente

manera:

$$Q = Q_0 + Q_{af} + Q_{bf} + Q_a$$

Siendo:

$Q_0$ : componente representativa de la tendencia lineal

$Q_{af}$ : componente representativa de la señal de alta frecuencia

$Q_{bf}$ : componente representativa de la señal de baja frecuencia

$Q_a$ : componente aleatoria

### 2.2.2. Definición de los parámetros utilizados

La tendencia lineal está definida por un valor medio constante = 80 m<sup>3</sup>/s y se adopta, en primera instancia, una pendiente nula y luego, pendiente positiva y negativa, correspondiente al 8% de variación a lo largo de 360 meses.

La señal de alta frecuencia se considera representada por la función seno con período  $T = 12$  meses y amplitud ( $A$ ) variable, correspondiente a las series de valores mensuales.

La señal de baja frecuencia está representada por la función seno con período  $T = 96$  meses y amplitud ( $A$ ) constante, correspondiente a fenómenos meteorológicos recurrentes con períodos mayores al anual.

La componente aleatoria se conforma por 360 valores generados de manera aleatoria con media cero, desvío estándar ( $DS$ ) variable y con un 95% de probabilidad de que la tendencia de dichos valores aleatorios sea nula.

Estas series serán comparadas y analizadas según su tendencia lineal, con la correspondiente de 3 series ideales ( $SI$ ) que se adoptaron como referencia. Las mismas se definen como la función de  $Q$  determinada solamente por la componente  $Q_0$  con pendiente de la tendencia nula (Serie 10), positiva (Serie 11) y negativa (Serie 12) y el valor de  $Q_{bf}$  representada por la función seno para  $T = 96$  meses y  $A = 45$  m<sup>3</sup>/s; además se adoptaron los valores de  $Q_{af}$  y  $Q_a$  iguales a cero, con el fin de observar claramente los ciclos determinados por fenómenos ajenos a la variabilidad estacional y aleatoria.

De esta manera se generaron un total de 48 series sintéticas, con las características detalladas en la Tabla 2.

**Tabla 2 - Parámetros utilizados en las distintas componentes que conforman las SS de caudales mensuales**

Componente	Parámetro	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4	Set 5	Set 6	Set 7	Set 8	Set 9	Series 10	Series 11	Series 12
Tendencia (b=80 m <sup>3</sup> /s)	Pendiente	nula	(+)	(-)	nula	(+)	(-)	nula	(+)	(-)	nula	(+)	(-)
$Q_{af}$ (T=12 meses)	A (m <sup>3</sup> /s)	45	45	45	25	25	25	5	5	5	0	0	0
$Q_{bf}$ (T=96 meses)	A (m <sup>3</sup> /s)	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
$Q_a$ (m <sup>3</sup> /s)	DS (a)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	0	0	0
	DS (b)	20	20	20	20	20	20	20	20	20			
	DS (c)	30	30	30	30	30	30	30	30	30			
	DS (d)	35	35	35	35	35	35	35	35	35			
	DS (e)	40	40	40	40	40	40	40	40	40			

En primera instancia, se seleccionaron los grupos de series 1, 4 y 7 (con tendencia lineal nula) para las opciones a, b, c, d, y e; y la Serie 10 (ideal) para la aplicación del índice SDI, en cada intervalo previamente definido: k1, k2, k3 y k4.

Como primera medida antes de aplicar los criterios de análisis de los índices SDI y para determinar el nivel de aplicabilidad de las SS generadas a secciones fluviales de la región central pampeana de la República Argentina, se determina el Coeficiente de Variación de los grupos de series estimadas y se comparan con el Coeficiente de Variación de una sección dentro del área mencionada (período 1980 – 2012), denominada Pueblo Andino. La misma pertenece a la cuenca del río Carcarañá y sus datos geográficos se detallan en la siguiente tabla.

**Tabla 3** - Ubicación de la estación hidrométrica Pueblo Andino

	<i>Latitud Sur</i>	<i>Longitud Oeste</i>	<i>Altitud</i>
<b><i>Pueblo Andino</i></b>	32° 40' 24''	60° 51' 57''	18 m.s.n.m

### 2.3 Criterios de análisis

Se seleccionaron los criterios para comparar y cuantificar las diferencias entre los índices SDI obtenidos de cada una de las series sintéticas y los índices SDI correspondientes a la serie de referencia. En función de la propiedad que se pretendió ponderar, los mismos se detallan a continuación.

#### 2.3.1. *Parámetros representativos de la diferencia en la magnitud:*

2.3.1.1. *Máxima diferencia relativa del pico:* muestra el máximo valor hallado de las diferencias entre cada valor extremo de los índices de la SS y el valor correspondiente del índice de la SI para el mismo período.

2.3.1.2. *Promedio del error cuadrático Medio:* Corresponde al promedio de los cuadrados de las diferencias de cada uno de los valores de los índices de la SS con sus respectivo valorde los índices de la SI.

#### 2.3.2. *Parámetro representativo de la duración relativa del período:*

*Cantidad relativa de cruces en cero:* Está definido por la cantidad de veces que la función correspondiente a los índices SDI de la SS cambia de signo, respecto de la cantidad de veces ocurridas para los índices en la SI

#### 2.3.3. *Parámetros representativos del desfase entre las series*

2.3.3.1. *Eventos opuestos:* muestra la cantidad de veces que un valor en la SS posee signo opuesto a su correspondiente valor en la SI

2.3.3.2. *Diferencia de Covarianza:* Se establece como un valor indicativo del desfase general entre los índices de la SS y la SI, a través de la diferencia entre 1 y la covarianza de ambas series.

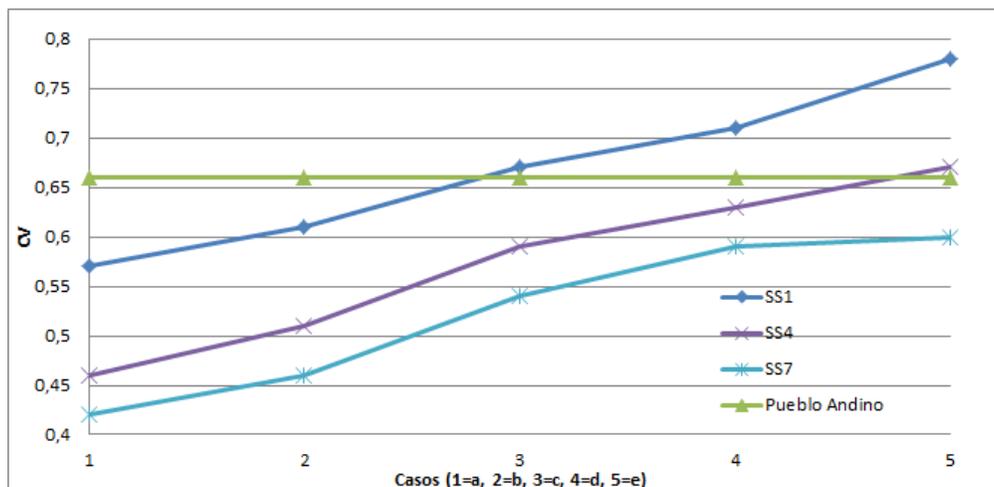
Posteriormente se realiza la sumatoria de dichos parámetros para cada SS definida y para cada intervalo k, con el fin de obtener un valor característico que indique los casos que mejor ajustan a una situación ideal predefinida y por ende, los que no.

Luego, para evaluar la influencia de la tendencia (Q0) en la observación de períodos de sequías dentro una SS de caudales mensuales, a través del índice SID, se seleccionan tres casos: el que mejor ajusta, el que peor ajusta y un caso promedio de ajuste a la situación ideal, dentro los grupos de series estudiados. Se determinaron las SS equivalentes a las de los casos seleccionados, pero con tendencia positiva y negativa y se aplicó el procedimiento antes descrito para los casos seleccionados.

Además se analizó la influencia de la componente aleatoria Qa, aplicando la metodología previamente descrita a la SS de caudales mensuales de un caso puntual, a la cual se le modificó solamente la componente Qa, una cantidad de 10 veces.

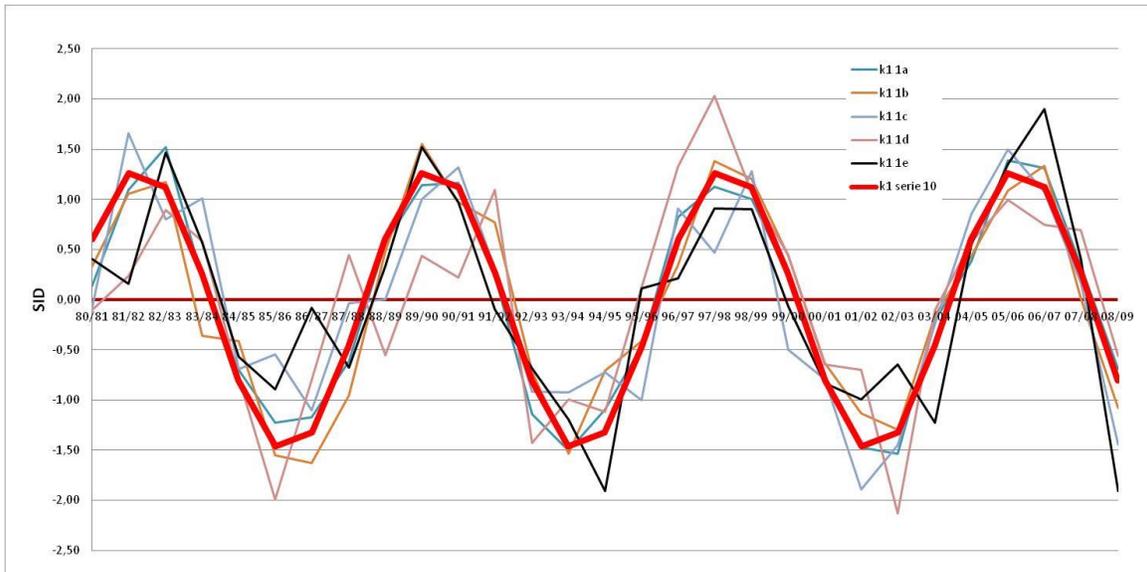
### 3 RESULTADOS

En primera instancia, para validar el nivel de aplicabilidad se calcularon los Coeficientes de Variación (CV) de los grupos de series SS1, SS4 y SS7 y de la sección real Pueblo Andino. Los valores son representados en el gráfico de la Figura 1 y permiten observar que las SS generadas son compatibles con dicha sección, particularmente para los casos de las SS 1c y SS 4e.

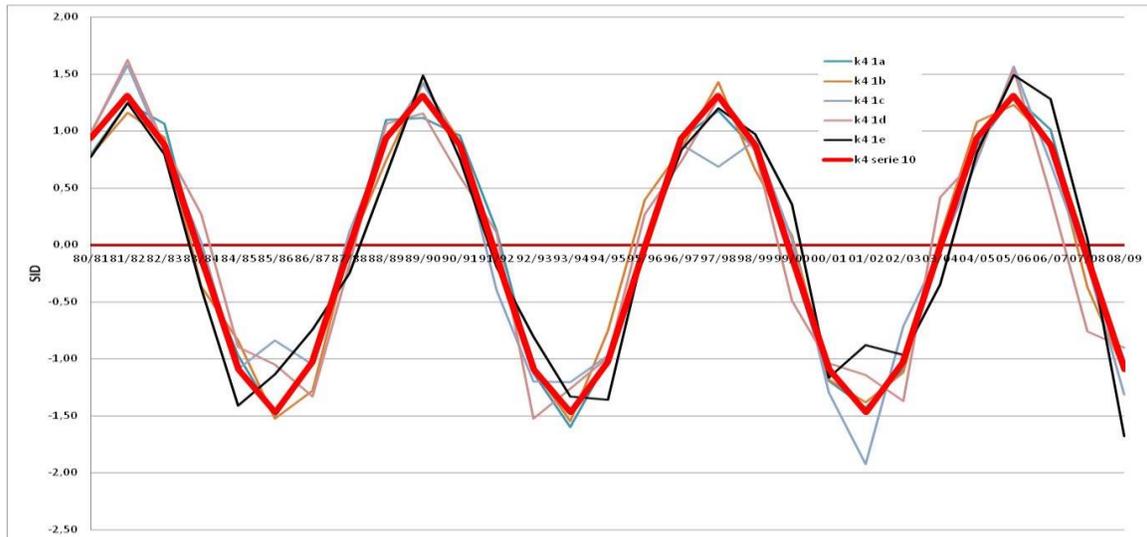


**Figura 1** -Comparación de los Coeficientes de Variación de los grupos de SS1, SS4 y SS7 y de la sección hidrométrica de Pueblo Andino (1980-2012)

Con respecto a la aplicación y cuantificación de las diferencias entre los SDI de las SS seleccionadas y su correspondiente SI, se observa que para el intervalo k1 del índice SDI, las series presentan grandes diferencias respecto de la serie ideal o de referencia (Figura 2), mientras que, las diferencias disminuyen a medida que se incrementa el intervalo de análisis dentro del año hidrológico, mejorando notoriamente el ajuste para los casos de k3 y k4 (Figura 3). Particularmente, para el intervalo k2, la serie 7a es la que mejor ajuste presenta respecto del grupo de series analizados. Es decir, que a partir del intervalo k2, no se observa una diferencia marcada debido a la variación de la amplitud de la componente de alta frecuencia (Qaf).



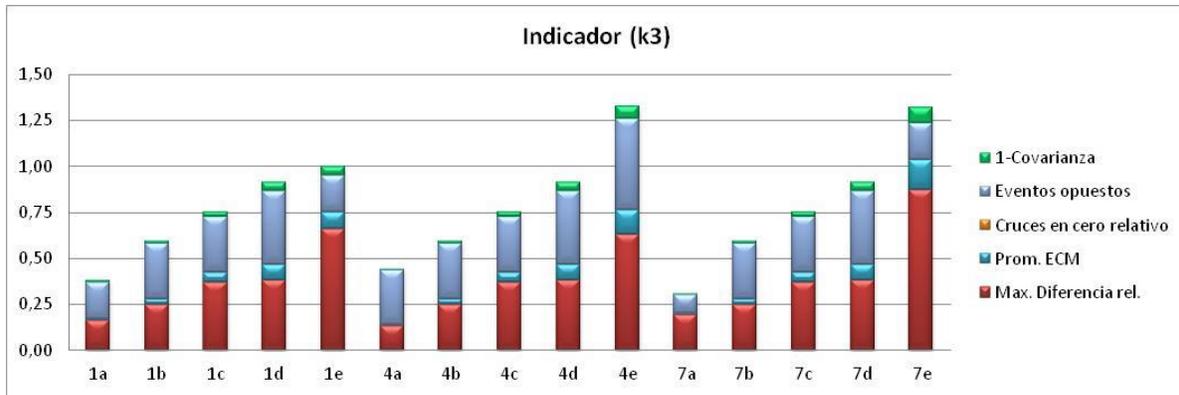
**Figura 2 - Valores del índice SDI (k1) de las SS 1 y la serie de referencia 10**



**Figura 3 - Valores del índice SDI (k4) de las SS 1 y la serie de referencia 10**

En general y para los 4 intervalos  $k$ , las series denominadas “a” son las que menor diferencia presentan con la serie de referencia, mientras que las series “e” son las que más error poseen respecto de la misma. Es decir, que a medida que se incrementa el desvío estándar de la componente aleatoria ( $Q_a$ ), el comportamiento de la SS se aleja del de la SI planteada para el análisis de las sequías hidrológicas. Se muestra un ejemplo en la Figura 4.

Con el fin de analizar la influencia de las tendencias definidas por la componente  $Q_0$  se seleccionaron los casos ya analizados para tendencia lineal nula, de las SS 7a para  $k_2$  por ser la serie que menor diferencia posee con su respectiva SI, la serie 4e para  $k_1$ , por ser el caso con mayor diferencia y la SS 1b para  $k_4$  como un caso promedio de ajuste respecto del mismo intervalo de la SI.

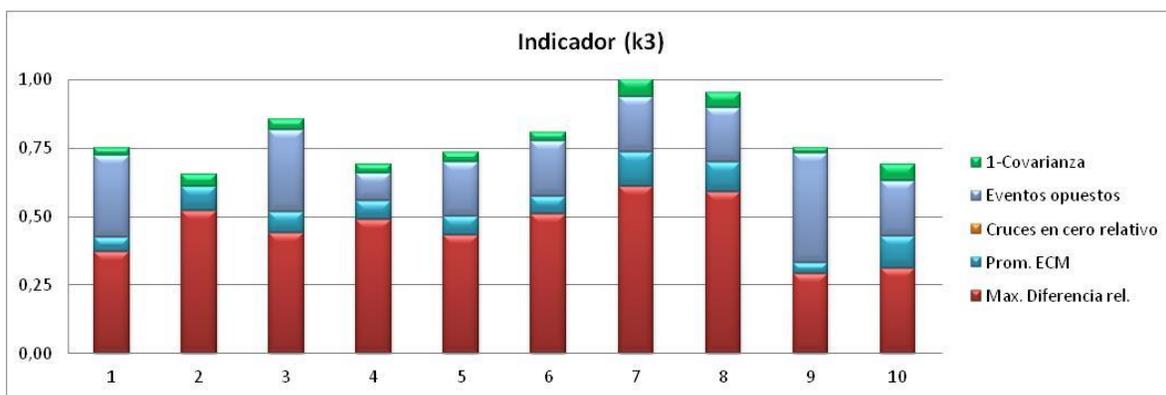


**Figura 4** - Indicador del ajuste de las SS 1, 4 y 7 respecto de la SI 10 para el intervalo k3 del SDI.

Las SS equivalentes a cada caso mencionado en el párrafo anterior, con tendencia lineal positiva son: 8a (para k2), 5e (para k1) y 2b (para k4) y para la tendencia lineal negativa son: 9a (para k2), 6e (para k1) y 3b (para k4). Las cuales fueron comparadas con sus respectivas series de referencia 11 y 12, según el caso.

Se pudo observar variaciones en los indicadores de ajuste del índice SDI respecto del mismo índice de sus correspondientes SI, para los distintos k analizados. Lo que muestra que se deben tener en cuenta las variaciones hidrológicas históricas a nivel regional, en caso de disponer de información confiable.

Respecto de la influencia de la componente aleatoria en la conformación de las SS para el posterior análisis de las sequías hidrológicas a través del índice SDI, se adopta como caso de estudio la SS 1c (debido a que es uno de los casos con mayor similitud del CV con la sección hidrométrica de Pueblo Andino) y se modifica 10 veces su componente aleatoria (las SS 1c obtenida en cada caso son representadas por los números del 1 al 10). Se observa que la influencia de la aleatoriedad es mayor para el intervalo k1, con una diferencia entre los casos de casi el 200% y disminuye a medida que se utilizan k superiores. Si bien, para el intervalo k3 la diferencia entre los indicadores de ajuste de los 10 casos es sólo del 35% y para el intervalo k4 asciende al 65%, éste último presenta el menor promedio entre dichos indicadores, es decir que a nivel general, tienen menor magnitud. Por lo que, se recomienda utilizar los intervalos k3 y k4 para evitar una influencia importante de la componente aleatoria de las SS en el análisis de las sequías hidrológicas a través del índice SDI. En la Figura 5 se muestra un ejemplo para el caso del intervalo k3.



**Figura 5** - Indicador para 10 casos de la SS 1c, con distinta componente aleatoria, para el intervalo k3 del SDI.

## 4 CONCLUSIONES

Este trabajo muestra, a través de la utilización de series sintéticas de caudales mensuales, que es posible analizar las sequías hidrológicas en zonas de llanura, tal como la región pampeana central de la República Argentina, utilizando el índice SDI y teniendo en cuenta determinadas condiciones para dicha metodología.

Aplicando el índice SDI para intervalos de análisis de tres meses (k1) dentro de cada año hidrológico de la serie de datos, los resultados muestran grandes diferencias respecto de lo esperable, mientras que, las diferencias disminuyen a medida que se incrementa el intervalo de análisis, mejorando notoriamente el ajuste para los casos de 9 meses (k3) y 12 meses (k4).

También se observa que las series de caudales mensuales se alejan de lo esperable a medida que se incrementa el desvío estándar de la componente aleatoria de dicha serie, aunque esta variable pierde influencia para los intervalos de análisis k3 y k4 del índice SDI.

Se muestra que se debe tener en cuenta la tendencia que presenten los registros, ya que tiene una influencia considerable en la determinación de la ocurrencia o no, de períodos de sequías hidrológicas y sus características en caso de haberlas.

Por lo antes descrito se recomienda, para el estudio de sequías hidrológicas en zonas de llanura, específicamente en la región pampeana central de la República Argentina, utilizar los intervalos de análisis de 9 y/o 12 meses del índice SDI aplicados a una serie de caudales mensuales.

## REFERENCIAS

- Mishra, A. K. y Singh, V. P. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology* 391 (2010) 202–216
- Nalbantis, I. (2008). Evaluation of a Hydrological Drought Index. *European Water* 23/24: 67-77
- Ortiz Gómez, R., Barragán Barrios, M. C. Y Alvarado Medellín, P. Evaluación de la sequía meteorológica a escala regional en la cuenca Lerma Chapala. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Punta del Este, Uruguay. Noviembre del 2010
- Palmer, W. C. (1965). Meteorological drought. *Research Paper No. 45, US-DC Weather Bureau.* Washington, D. C. U.S.A.
- Thomas, H Y Fiering, M, 1962. Mathematical synthesis of streamflow sequences for the analysis of river basins by simulations. Maass A, Humfschmidt MM, Dorfman R, Thomas Jr HA, Marglin SA, Fair GM (eds.) *Design of water resource systems.* Harvard University Press, Cambridge
- Wagner Gómez A.I., Ortiz Gómez R. Y Barragán Barrios M.C. Evaluación de la sequía hidrológica en la cuenca Lerma–Chapala. XXII Congreso Nacional de Hidráulica. Acapulco, Guerrero, México, Noviembre 2012